

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПРОПИТКИ И СУШКИ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК

И. А. ВОЛКОМИРСКИЙ, Н. М. НОВОСЕЛОВА, А. Я. ЦИРУЛИК

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин)

От степени монолитности всыпных обмоток существенно зависит надежность изоляции обмоток в процессе эксплуатации машин. Монолитность достигается пропиткой обмоток в электроизоляционных лаках с последующей сушкой и зависит как от цементирующих свойств лака, так и от режимов пропитки и сушки. Для повышения надежности обмоток необходимо определять оптимальные режимы техпроцесса пропитки и сушки обмоток, обеспечивающие большую степень монолитности обмотки.

В настоящей статье изложены результаты экспериментального исследования возможности повышения качества обмоток при пропитке их лаком МЛ-92 (обмоточный провод — ПЭТВ) по технологии, применяемой на заводе «Электромашина» (г. Прокопьевск). Согласно этой технологии якорь машины постоянного тока, нагретый до температуры 60—80°C, погружается в холодный лак и выдерживается в течение 30 минут, после чего вынимается, и лак стекает в течение 10—20 минут. Сушка производится в два этапа. Сначала при температуре 60—80°C в течение двух часов — для удаления растворителя. Затем при температуре 140°C в течение 14 часов — для реализации процесса полимеризации лака и перехода его в термореактивное состояние.

Определение оптимальных условий протекания процесса, при которых получается лучшее качество, осуществляется путем проведения и анализа результатов многофакторного эксперимента, спланированного согласно математической теории эксперимента. В качестве входных параметров, характеризующих техпроцесс, могут быть следующие параметры:

$\eta$  — вязкость лака при 20°C, сек по ВЗ-4;

$t_{\text{и}}$  — температура изделия при погружении его в лак, °C;

$T_{\text{п}}$  — длительность процесса пропитки, мин;

$t_{\text{с}}$  — температура в печи при сушке в процессе удаления летучих, °C;

$T_{\text{с}}$  — длительность сушки, час;

$t_{\text{д}}$  — температура в печи в процессе полимеризации (цементации) лака, °C;

$T_{\text{д}}$  — длительность процесса цементации, час.

Из физических соображений факторы 2, 3, 4 и 5 были исключены из числа варьируемых на первом этапе исследования. Температуру изделия при погружении в лак повышать нежелательно из-за повышения интенсивности испарения растворителя из лака. Длительность процесса



пропитки можно считать достаточно обоснованной имеющимся производственным опытом. Кроме того, эта длительность невелика по сравнению с длительностью всего процесса. Уровни факторов 4 и 5 также достаточно обоснованы производственным опытом. Увеличение температуры сушки приводит к быстрому образованию поверхностной пленки лака, что затрудняет удаление растворителя из внутренних объемов обмотки. Длительность сушки соответствует данной температуре сушки. Сокращение числа переменных существенно упрощает план эксперимента. Варьируемыми входными параметрами технологии являются  $\eta = x_1$ ,  $t_{\text{ц}} = x_2$  и  $T_{\text{ц}} = x_3$ .

Исследование целесообразно провести не на реальных изделиях, а на макетах. Это облегчает оценку получаемого результата, то есть степени монолитности обмотки. Оценка монолитности можно осуществить по величине усилий вырыва проводников, заложенных между проводниками обмотки макета. Такой метод оценки вытекает из методики оценки цементирующей способности лака по ГОСТ 13526—68. Макет выполнялся следующим образом. Сердечник статора асинхронного двигателя четвертого габарита, предварительно проваренный по наружной поверхности продольными швами, был разрезан дисковой фрезой на сегменты. Каждый сегмент имел по 5 пазов, в которые с коэффициентом заполнения 0,75 укладывались проводники ПЭТВ  $\varnothing 1,6$  мм. Проводники выступали из паза на 10 мм с одной стороны и на 50 мм — с противоположной стороны. В каждый паз между основными проводниками помещались испытательные проводники по пять штук на паз, проникающие в паз на длину 50 мм. Эти проводники после выполнения пропитки и сушки макета вырываются на разрывной машине для оценки степени цементации при разных режимах пропитки и сушки. Выступающие из паза лучки проводников бандажировались для имитации примерно таких же условий проникновения лака в паз, как в якоре машины. Уровни варьирования переменных показаны в табл. 1.

Таблица 1

	$x_1$ , сек	$x_2$ , °C	$x_3$ , час
Верхний уровень (+)	20	140	14
Нижний уровень (—)	16	100	10
Нулевой уровень (0)	18	120	12
Интервал варьирования	2	20	2

План эксперимента показан в табл. 2 (опыты № 1÷8). Каждому опыту соответствует один макет. После пропитки и сушки макетов и определения усилий вырыва проводников для каждого макета (опыта) вычислены среднее значение  $Q$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  и коэффициент вариации  $v$  усилий вырыва проводников. Эти параметры приведены в табл. 2.

Распределение усилий вырыва в каждом опыте показано на рис. 1. Среднее значение усилия неполно характеризует распределения. В некоторых случаях при большем среднем может быть большая дисперсия за счет появления малых усилий вырыва. Это говорит о большой вероятности появления слабых мест в обмотке при хорошей в среднем цементации.

Желательным является распределение усилий, характеризующееся высоким средним при малой дисперсии. Коэффициент вариации  $v$  уменьшается при возрастании среднего и уменьшении дисперсии, то



№ опыта	$\eta$	$t_{II}$	$T_{II}$	$\bar{Q}$ , кгс	$\sigma$ , кгс	$v$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$			
1	—	+	+	46,4	2,09	0,045
2	+	—	+	41,1	3,90	0,095
3	+	+	—	45,0	1,21	0,027
4	—	—	—	20,4	9,90	0,485
5	+	—	—	20,2	8,96	0,444
6	—	+	—	41,5	2,48	0,060
7	—	—	+	31,6	7,19	0,228
8	+	+	+	44,1	2,23	0,050
9	0	+2	-3	41,2	4,89	0,119
10	0	+2	—	45,6	1,88	0,041
11	0	+2	0	46,6	2,07	0,044

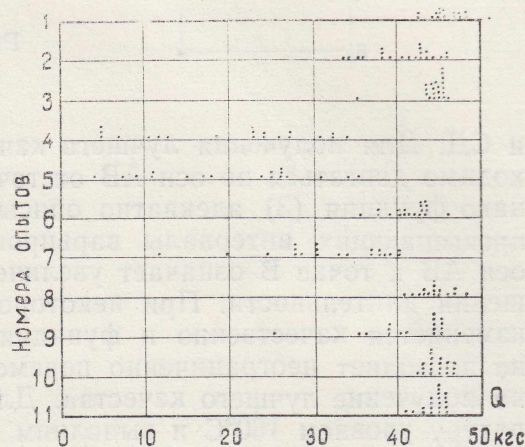


Рис. 1. Распределение усилий вырыва проводников из паза в каждом опыте

есть он обладает хорошей разрешающей способностью при оценке выходного качества в каждом опыте. Этот параметр и принят в качестве выходного.

Регрессионный анализ результатов эксперимента позволил получить зависимость параметра  $v$  от входных параметров в следующем виде:

$$v = 0,1793 - 0,0265 \cdot x_1 - 0,1338 \cdot x_2 - 0,0748 \cdot x_3 + 0,0182 \cdot x_1 x_2 - 0,0067 \cdot x_1 x_3 + 0,0767 \cdot x_2 x_3. \quad (1)$$

Изменение параметра  $v$  при изменении входных параметров можно вычислить по (2), вытекающему из (1).

$$\Delta v = 10^{-4} \cdot [7 \cdot \Delta x_1 + 174 \cdot \Delta x_2 + 56 \cdot \Delta x_3 + 3,3 \cdot \Delta(x_1 x_2) + 0,46 \cdot \Delta(x_1 x_3) + 59 \cdot \Delta(x_2 x_3)]. \quad (2)$$

Фактор  $x_1$  при изменении его в пределах интервала варьирования не оказывает значимого влияния на выходной параметр, поэтому его в уравнении (1) можно зафиксировать на одном уровне, например, на центральном ( $x_1 = \eta = 18$  сек). Тогда получим следующую зависимость:

$$v = 0,1793 - 0,1338 \cdot x_2 - 0,0748 \cdot x_3 + 0,0767 \cdot x_2 x_3. \quad (3)$$

Изокванты поверхности, описываемой выражением (3), изображены на рис. 2. Поверхность имеет седлообразную форму с осями АВ



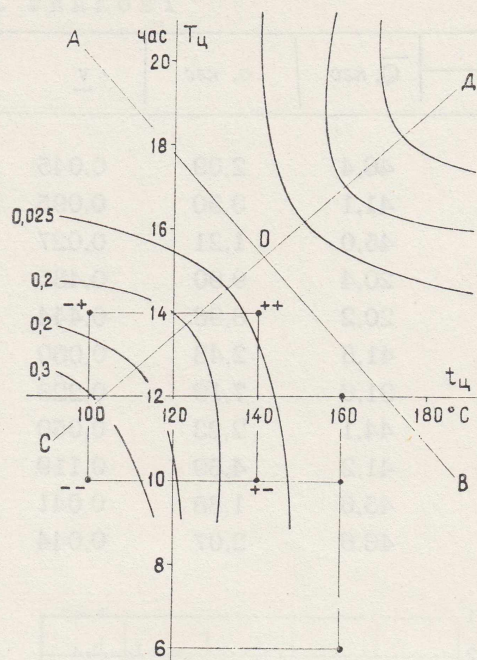


Рис. 2. Изокванты поверхности отклика

и СД. Для получения лучшего качества (меньшего значения  $v$ ) необходимо двигаться по оси АВ от точки О к точке В неограниченно. Однако функция (3) адекватно описывает процесс лишь в пределах, не превышающих интервалы варьирования в 1,5—2 раза. Движение по оси АВ к точке В означает увеличение температуры сушки при уменьшении длительности. При некоторой повышенной температуре процесс изменяется качественно и функция (3) становится неадекватной. Это не позволяет неограниченно перемещаться вдоль оси АВ и надеяться на получение лучшего качества. Для провода ПЭТВ ограничим температуру уровнем  $160^{\circ}\text{C}$  и выполним опыты при трех значениях длительности сушки: 6 часов, 10 часов и 12 часов. Результаты показаны в табл. 2 (опыты 9, 10, 11) и на рис. 1. Лучший результат получается при условии  $t_{\text{ц}}=160^{\circ}\text{C}$  и  $T_{\text{ц}}=10$  часов. Таким образом, повысив температуру сушки на стадии полимеризации лака до  $160^{\circ}\text{C}$ , можем сократить требуемую длительность режима сушки с 14 до 10 часов.

Для проверки, не оказывает ли сушка при температуре  $160^{\circ}\text{C}$  в течение 10 часов отрицательного влияния на витковую изоляцию провода, был поставлен сравнительный эксперимент, в котором одна партия проводников после пропитки сушилась при температуре  $140^{\circ}\text{C}$  в течение 14 часов, а другая партия — при температуре  $160^{\circ}\text{C}$  в течение 10 часов. Обе партии проводников нарезаны из провода ПЭТВ с одной катушки. После сушки проводники испытывались в дробь и сравнивались распределения пробивных напряжений витковой изоляции обеих партий провода. В обоих случаях дефектных мест и микротрещин изоляции (малых напряжений пробоя) не обнаружилось. Это указывает на допустимость использования режима сушки при  $160^{\circ}\text{C}$  в течение 10 часов, что на 4 часа сокращает длительность технологического цикла пропитки и сушки обмоток машин малой мощности.